

**PODWYŻSZANIE ROZDZIELCZOŚCI PRZESTRZENNEJ OBRAZÓW
WIELOSPEKTRALNYCH IKONOS – STATYSTYCZNE I WIZUALNE
PORÓWNANIE WYNIKÓW OTRZYMANÝCH RÓŻNYMI FORMUŁAMI**

**VARIOUS FORMULAS FOR PAN-SHARPENING
OF MULTISPECTRAL IKONOS IMAGES –
STATISTICAL AND VISUAL ASSESSMENT OF RESULTS**

Tomasz Pirowski, Grażyna Bobek

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: integracja danych teledetekcyjnych, interpretacja wizualna, ocena formalna, Ikonos

STRESZCZENIE: W publikacji przedstawiono wyniki badań związanych z integracją danych spektralnych o niższej rozdzielczości przestrzennej z obrazami panchromatycznymi o wyższej rozdzielczości przestrzennej. Analizy przeprowadzono na danych Ikonos. Testowano pięć metod integracji danych, każdą w kilku wariantach.

Celem badań był wybór optymalnej metody, zapewniający uzyskanie obrazu wzmocnionego przestrzennie przy jak najwierniejszym zachowaniu właściwości spektralnych.

Zaproponowano niestandardową metodykę, a mianowicie przeprowadzenie wstępnych testów scalania danych obrazowych na materiałach zdegradowanych przestrzennie w taki sposób, że obrazami referencyjnymi stały się oryginalne kanały spektralne. Podejście takie umożliwiło porównanie wprost obrazów po integracji z obrazami oryginalnymi, przez co możliwa była ocena faktycznych wielkości zniekształcenia i wzmocnienia obrazów syntetycznych, jakie powstają przez stosowanie różnych formuł.

Najlepsze parametry formalne i wysokie walory interpretacyjne scalonych obrazów otrzymano stosując metodę HPF. Standardowa metoda integracji – IHS - uzyskała najgorsze wyniki spośród pięciu wykorzystanych metod.

1. OBSZAR BADAŃ I DANE OBRAZOWE

Badania przeprowadzono na polu testowym obejmującym fragment aglomeracji krakowskiej (tereny miejskie i podmiejskie). Zestaw danych wykorzystanych do integracji stanowiły obrazy Ikonos (Rys. 1) zarejestrowane 7 maja 2003 roku dla zachodniej części Krakowa. Do badań użyto cztery kanały spektralne o rozdzielczości 4 m (niebieski, zielony, czerwony i bliską podczerwień) oraz 1-metrowy obraz panchromatyczny (PAN). Jako pola testowe wybrano obszary charakteryzujące się różnorodnym pokryciem terenu, a przy tym pozbawione wad rejestracji, jak częściowe zamglenie (widoczne na dolnym fragmencie sceny) czy smuga kondensacyjna po przelocie samolotu (prawa część sceny).

Dla tak wybranych fragmentów przeprowadzono integrację obrazów, a następnie oceniono wyniki pod względem formalnym i wizualnym odrębnie dla kompozycji barwnych (KB) z kanałów 123 (zakres widzialny RGB) oraz 234 (kompozycja w barwach fałszywych tzw. FCC *False Color Composit*).



Rys. 1. Zakres danych Ikonos oraz lokalizacja pól testowych „A” i „B”: a) mapa z serwisu www.zumi.pl; b) Ikonos - kompozycja barwna z kanałów RGB

2. IDEA INTEGRACJI DANYCH OBRAZOWYCH

Lewiński (2001) używa określenia „łączenia” zdjęć o różnej rozdzielczości terenowej, czyli „przetwarzania do postaci stanowiącej syntezę danych wejściowych”. „Idea łączenia polega na uzyskaniu nowego obrazu, utrzymanego w barwach kompozycji RGB zdjęcia wielospektralnego, mającego równocześnie szczegółowość zdjęcia panchromatycznego”, a wybór metody łączenia „powinien zależeć od celu, jaki chcemy osiągnąć, możliwości oprogramowania oraz od doświadczenia operatora”.

Mularz (2001) stosuje zamiennie terminy „scalania” oraz „integracji” obrazów. Nie definiuje samego procesu integracji, natomiast zaznacza, że nie wszystkie dostępne metody scalania realizują założenie „braku redukcji” i ograniczonego „zniekształcenia” informacji spektralnej. Jako przyczynę rozwoju idei scalania danych wskazuje „konieczność odwzorowania relatywnie małych obiektów, cech strukturalno-teksturalnych i jednoczesnego zachowania bogatej informacji spektralnej, którą w dostępnych systemach satelitarnych charakteryzuje zbyt mała rozdzielczość przestrzenna”.

Mróz (2001) uważa, że „jednym z istotnych zagadnień w zakresie przetwarzania obrazów satelitarnych jest opracowanie metod i algorytmów podwyższania rozdzielczości przestrzennej (geometrycznej) obrazów wielospektralnych przy wykorzystaniu obrazów panchromatycznych”. *Data fusion* interpretuje jako „bezstratną” metodę „łączenia/integracji/fuzji/kombinacji” informacji pochodzących z obrazów o różnej rozdzielczości. Pod pojęciem „bezstratne” rozumie „zachowywanie charakterystyk spektralnych” oryginalnych obrazów spektralnych w nowych syntetycznych obrazach o „dokładności lokalizacji obiektów w skali i stopniu szczegółowości kanału wysokorozdzielczego”. Ideę scalania prezentuje (Rys. 2).



Rys. 2. Idea scalania obrazów spektralnych z obrazem panchromatycznym

3. CEL I METODYKA BADAŃ

Celem badań był wybór optymalnej metody integracji, a w jej obrębie wybór najlepszego wariantu, zapewniający uzyskanie zestawu kanałów spektralnych wzmocnionych przestrzennie przy jak najwierniejszym zachowaniu ich pierwotnych właściwości spektralnych. Założono, że ocena realizacji powyższego postulatu zostanie przeprowadzona metodami formalnymi (statystycznymi), z kontrolą w postaci oceny walorów wizualnych kompozycji barwnych.

3.1. Klasyczna weryfikacja wyników integracji obrazów

Ocena wyników przez wizualne porównanie wzmocnionych przestrzennie kompozycji barwnych względem kompozycji oryginalnych jest trudne i charakteryzuje się dużą subiektywnością. Zadanie to staje się praktycznie niemożliwe w przypadku testowania wielu metod scalania, różnych zestawów danych i kompozycji barwnych. Częściowym rozwiązaniem tych problemów są sformalizowane procedury wizualnej oceny (Pellemans *et al.*, 1993; Pirowski, 2006) lub oceny koncentrujące się na przydatności fotointerpretacyjnej dla rozwiązania konkretnego problemu (Mularz *et al.*, 2000) lub dla określonych rodzajów kategorii terenu (Garguet-Dupont *et al.*, 1996).

Inne podejście to zastosowanie parametrów formalnych (statystycznych), które scharakteryzowałyby w obiektywny sposób nowe, syntetyczne obrazy. Przeprowadza się próby takiej oceny, np. wskaźnikami określającymi ogólne zniekształcenie spektralne, jak RASE – *Relative Average Spectral Error* (Ranchin *et al.*, 2000) i jego modyfikacja nQ% – *new Quantity* (Wald, 2000), wzmocnienie przestrzenne, jak „efektywna rozdzielczość pikseli” (Vrabel, 2000), AIL% - *Average Laplacian Index* (Pirowski, 2006), a także kompleksowo - uwzględniając oba typy wskaźników jednocześnie (Pirowski, 2006). Wyniki te nie są w pełni miarodajne, gdyż brakuje odpowiedniego obrazu referencyjnego (tj. obrazu o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej, jaki rejestrowałby sensor wielospektralny, gdyby faktycznie istniał) do wykrycia rzeczywistego zniekształcenia spektralnego. W zamian porównuje się KB w wyższej rozdzielczości przestrzennej do KB w rozdzielczości oryginalnej. Podobnie, z powodu braku obrazu referencyjnego, wzmocnienie jest oceniane jedynie w relacji do obrazu panchromatycznego (porównuje się KB lub poszczególne kanały spektralne w wyższej rozdzielczości przestrzennej do obrazu PAN). Brak zgodności porównywanych danych ilustruje Rys. 2. Rozwiązaniem tego

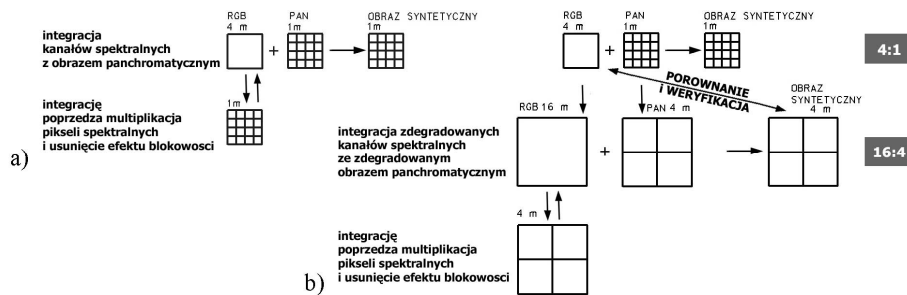
problemu jest dwuetapowa integracji obrazów, prowadzona na dwóch poziomach rozdzielczości.

3.2. Dwuetapowa integracja obrazów i propozycja weryfikacji wyników

Podejście takie umożliwia porównanie obrazów syntetycznych z oryginalnymi, oddając faktyczne wielkości zniekształcenia i wzmocnienia obrazów syntetycznych, jakie powstają przez stosowanie różnych metod integracji. Tego typu rozwiązanie zostało zaproponowane przez Walda (2000), który poddawał testom obrazy Landsat i Spot.

W pierwszym etapie degraduje się dane w takim stosunku, w jakim występuje różnica rozdzielczości pomiędzy obrazami spektralnymi i obrazem PAN. W przypadku Ikonosa ta proporcja wynosi 4:1, więc degradacja danych jest 4-krotna. Po takim zabiegu obrazy spektralne posiadają rozdzielczość 16m a obraz PAN – 4m. Scalając takie dane, powstają kanały spektralne po fuzji o rozdzielczości 4m, które teoretycznie powinny być identyczne z oryginalnymi danymi spektralnymi Ikonos (Rys. 3b).

Ponieważ fuzja obrazów jest zabiegiem sztucznym, nie należy oczekiwać, że powyższy postulat zostanie w pełni zrealizowany. W praktyce, przy stosowaniu klasycznej metody integracji danych (Rys. 3a), notuje się znaczne różnice w wynikach, związane głównie z wyborem metody scalania i doбором parametrów. Dlatego też przeprowadzenie podobnych testów porównawczych, ale tym razem na danych zdegradowanych, pozwoli na łatwiejszą i bardziej precyzyjną ocenę wizualną efektów scalenia. Możliwe wtedy stanie się też prawidłowe wykorzystanie formuł statystycznych zaproponowanych przez Walda (2000) i Zhou *et al.* (1998), rozwiniętych przez Pirowskiego (2006) do postaci tzw. „diagramu wyników”. Diagram pozwala na wskazanie metod, które ze zbioru testowanych podejść charakteryzują się największym wzmocnieniem przestrzennym, a przy tym posiadają najmniejsze zniekształcenie spektralne w stosunku do obrazów referencyjnych.



Rys. 3. Integracja danych: a) klasyczna; b) z wstępną degradacją rozdzielczości

4. TESTOWANE FORMUŁY INTEGRACJI

4.1. Metoda IHS

Najbardziej rozpowszechniona technika scalania obrazów. Model IHS opisuje barwy za pomocą jasności (*Intensity*), odcienia (*Hue*) i nasycenia (*Saturation*). Procedura integracji polega na przekształceniu barw RGB do postaci IHS i z powrotem. Zakłada się,

że informacja przestrzenna koncentruje się w składowej I, a tematyczna w składowych H i S (Chavez *et al.*, 1991). Za składową I podstawia się odpowiednio znormalizowany obraz panchromatyczny i wykonuje się transformację odwrotną. W testach normalizację przeprowadzono dwoma metodami: średniej i wariancji oraz regresji liniowej.

Z uwagi na dużą popularność metody IHS dokonuje się często jej modyfikacji w celu wyeliminowania wad skalonych obrazów. W efekcie nowe obrazy charakteryzują się lepszymi walorami wizualnymi (Mróz, 2001) i lepszymi parametrami formalnymi (Mularz *et al.*, 2006) niż podejście klasyczne. Z uwagi na małą popularność zmodyfikowanych formuł w testach zastosowano standardową procedurę IHS.

4.2. Metoda Wiemker'a (WMK)

Podejście, wykorzystujące dzielenie międzykanałowe, dało początek grupie metod skalania danych zwanych SRC - *Spectral Relative Contribution* (Wiemker *et al.*, 1998). Cechą wspólną tych rozwiązań jest to, że oryginalna odpowiedź spektralna w danym kanale – wartość atrybutu piksela - jest mnożona przez pewien współczynnik – wagę. Jest ona równa ilorazowi kanału PAN i kombinacji kanałów spektralnych, które pokrywają swoim zakresem spektralnym kanał panchromatyczny.

Jedną z pierwszych propozycji tego typu była metoda P+XS stosowana dla kanałów widzialnych SPOT, opracowana przez CNES - *Centre National d'Etudes Spatiales*. Rozszerzeniem metody ilorazowej na więcej niż dwa kanały spektralne są: transformacja Brovey'a oraz metoda CN - *Color Normalised* (Hallada *et al.*, 1983). Żadna z nich nie zapewnia zachowania średniej wartości odpowiedzi spektralnej dla nowego generowanego kanału spektralnego. Dlatego Wiemker *et al.* (1998) proponują obliczyć średnią odpowiedź spektralną na obrazie oryginalnym, a następnie parametr ten wykorzystać do ostatecznego ustalenia jasności syntetycznego obrazu (poprzez odpowiednie przesunięcie histogramu).

4.3. Metoda HPF

Metoda HPF (*High-Pass Filter*) polega na zastosowaniu filtra górnoprzepustowego na obrazie panchromatycznym. Zakłada się, że tego typu filtracja usuwa większość informacji spektralnej, pozostawiając przede wszystkim informacje wysokoczęstotliwościowe, które głównie odnoszą się do informacji przestrzennej (Showengerdt, 1980; Chavez *et al.*, 1991).

W badaniach obraz panchromatyczny był na wstępie poddawany normalizacji poprzez dobór histogramu, tak, aby jego średnia i wariancja zbliżone było do parametrów poszczególnych kanałów spektralnych. Następnie wynik filtracji HPF obrazu PAN był dodawany – piksel po pikselu – do poszczególnych kanałów spektralnych. Głównym parametrem wpływającym na jakość integracji były: okno filtrowania (3x3; 5x5; 7x7; 9x9; 11x11) oraz wagi przyporządkowane sumowanemu obrazowi HPF (0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1.0).

4.4. Metoda LCM

W metodzie LCM (*Local Correlation Modelling*) zakłada się, że podobieństwo umiejscowienia krawędzi powinno manifestować się lokalną korelacją pomiędzy kanałami, o ile okno analiz okaże się wystarczająco małe. Taka lokalna zależność powinna

występować nawet wtedy, kiedy nie zachodzi globalna korelacja między zestawami danych (Hill *et al.*, 1999).

W metodzie w pierwszym kroku degradowane jest zdjęcie PAN. Następnie, w ruchomym oknie o zadanej wielkości (w badaniach testowano okna: 5x5; 7x7; 11x11), obliczana jest lokalna korelacja oraz współczynniki regresji pomiędzy zdegradowanym obrazem PAN a obrazem spektralnym (kształt lokalnej korelacji zostaje opisany poprzez lokalną analizę regresji). W trzecim kroku tak obliczone współczynniki wykorzystuje się do wygenerowania syntetycznych kanałów spektralnych w oparciu o oryginalny obraz panchromatyczny.

Ten ostatni zabieg jest możliwy przy założeniu, że lokalna korelacja stwierdzona pomiędzy obrazem spektralnym a zdegradowanym obrazem panchromatycznym ma również odniesienie do oryginalnego obrazu PAN o rozdzielczości wyższej. Hill *et al.* (1999) raportują, że dobre wyniki uzyskuje się dla obszarów o współczynniku korelacji przekraczającym bezwzględną wartość 0,66. Dla pozostałych obszarów zalecają stosowanie innych metod skalania.

4.5. Metoda Pradines'a (PRAD)

Pradines (1986) przyjmuje, iż niedobór informacji przestrzennej w odwzorowaniu multispektralnym może być zrekompensowany poprzez odpowiednie operacje na różnych poziomach rozdzielczości obrazu panchromatycznego. W pierwszym kroku degradowane jest zdjęcie PAN w tzw. „superpiksele”. „Superpiksel” jest geometrycznie zlokalizowany identycznie jak piksel spektralny, jest równy mu powierzchniowo, a jego wartość jasności jest wartością uśrednioną z wartości pikseli oryginalnego obrazu PAN. Następnie multiplikuje się piksele obrazu zdegradowanego do pierwotnej rozdzielczości i taki obraz porównuje się z oryginalnym obrazem PAN. Powstaje obraz teksturalny, który niesie informację, w jakim stopniu pojedynczy piksel obrazu PAN różni się od swojego najbliższego otoczenia.

Ta zależność jest wykorzystywana do podwyższenia rozdzielczości poszczególnych kanałów spektralnych. Następuje to poprzez iloczyn wartości pikseli kanału oryginalnego i obrazu teksturalnego PAN. Badania (Mularz *et al.*, 2000) wykazały, że lepsze wyniki wizualne i formalne uzyskuje się rezygnując z „superpiksela” na rzecz filtracji dolnoprzepustowej obrazu PAN o oknie filtracji zbliżonym wielkością do „superpiksela”.

5. OCENA I PORÓWNANIE SCALONYCH OBRAZÓW

Formalna i wizualna ocena przydatności metod łączenia przeprowadzona została na zdegradowanych obrazach Ikonos, odpowiednio do 16m dla kanałów spektralnych i do 4m dla kanału PAN, zgodnie z ideą opisaną w rozdziale 3.2. Wyselekcjonowane w ten sposób metody posłużyły do integracji oryginalnych obrazów Ikonos. Wyniki skalonych kompozycji barwnych o rozdzielczości 1m oceniono pod względem fotointerpretacyjnym.

5.1. Zniekształcenie spektralne

Ocenę zmian informacji tematycznej oparto o parametr nQ% zaproponowany przez Walda (2000). Jego uproszczona postać, w której nie jest uwzględniana bezwzględna

rozdzielczość pikseli scalanych obrazów, dla pojedynczej kompozycji barwnej przybiera postać (1), gdzie (b) oznacza kanał spektralny:

$$(1) nQ_{\%} = 100 * \sqrt{\frac{1}{3} * \sum_{b=1}^3 \frac{RMS(b)^2}{MS_{sr}(b)^2}}$$

Parametr ten informuje o względnej wartości średniego błędu kwadratowego jasności wszystkich pikseli z trzech scalonych kanałów spektralnych w stosunku do obrazów referencyjnych. Wartość wyrażona jest w procentach, gdyż odnosi się do średniej jasności sceny. Wskaźnik pozwala opisać w sposób syntetyczny poziom błędu informacji tematycznej dla kompozycji barwnej wzmocnionej przestrzennie.

5.2. Wzmocnienie przestrzenne

Stopień wzmocnienia określono bazując na obrazie PAN oraz scalonych kanałach spektralnych. Zarówno obraz PAN, jak i oceniane obrazy spektralne, poddaje się na wstępie filtracji górnoprzepustowej, a następnie bada się parami zgodność obecności krawędzi za pomocą korelacji, uzyskując wartość $r_{HP3}(b)$ (Zhou *et al.*, 1998). Im większa bezwzględna wartość współczynnika r, tym większe jest uczytelnienie kanału spektralnego. Takie rozwiązanie gwarantuje, że na wielkość korelacji nie ma wpływu stopień zgodności informacji tematycznej zawartej na porównywanych ze sobą obrazach. Taką wadę posiada najczęściej stosowana miara polegająca na badaniu wprost korelacji pomiędzy obrazem PAN a kanałem spektralnym o podwyższonej rozdzielczości.

Pirowski (2006), zaproponował parametr AIL% - *Average Laplacian Index* (3), bazujący na rozwiązaniu Zhou *et al.* (1998). Jest on średnią arytmetyczną współczynników determinacji korelacji R^2 wyrażonych w %, tzw. IL% - *Laplacian Index* (2). Wartość parametru IL% można interpretować jako stopień obecności krawędzi na scalonym obrazie spektralnym w stosunku do znajdujących się krawędzi w kanale panchromatycznym. Zatem średnia z trzech takich parametrów (3) obliczonych dla każdego z kanałów wchodzących w skład KB jest miarą średniego wzmocnienia przestrzennego danej kompozycji barwnej.

$$(2) IL(b)_{\%} = 100\% * r_{HP3}(b)^2$$

$$(3) AIL_{\%} = \frac{1}{3} * \sum_{b=1}^3 IL(b)_{\%}$$

5.3. Diagramy wyników

Metoda „diagramu wyników”, opracowana przez Pirowskiego (2005, 2006) pozwala na graficzne ujęcie wzajemnych relacji wzmocnienia przestrzennego i zniekształcenia spektralnego poszczególnych obrazów syntetycznych, kompozycji barwnych lub pełnego zestawu kanałów poddanych integracji z obrazem PAN. Atutem metody jest możliwość łatwego porównania dużej ilości wyników i na podstawie analizy graficznej rozkładu punktów wskazanie relatywnie najlepszej metody scalania. Na diagramie, na osi x

podawana jest wielkość zniekształcenia spektralnego wg wskaźnika $nQ\%$ (1), na osi y - uczytelnienia wg wskaźnika $AIL\%$ (3).

W przypadku stosowania tej metody na danych zdegradowanych idealne wyniki to $nQ\%=0$ oraz $AIL\%=100$. Metodę scalania, dla której zanotuje się wartości najbardziej zbliżone do powyższych, należy uznać za potencjalnie najlepszą. Taką, która teoretycznie pozwoli uzyskać dla obrazów oryginalnych najlepsze wzmocnienie przestrzenne przy najmniejszym możliwym ich zniekształceniu spektralnym w stosunku do obrazu, jaki teoretycznie byłby rejestrowany przez sensor o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej. Tak prostej interpretacji „diagramu wyników” nie było w przypadku integracji danych bez wstępnej degradacji obrazów. Dotychczas to było głównym powodem niejednoznaczności metody, która pozwalała tylko na wyselekcjonowanie zbioru najlepszych metod scalania spośród wszystkich testowanych (Pirowski, 2005; Pirowski, 2006).

5.4. Ocena wizualna

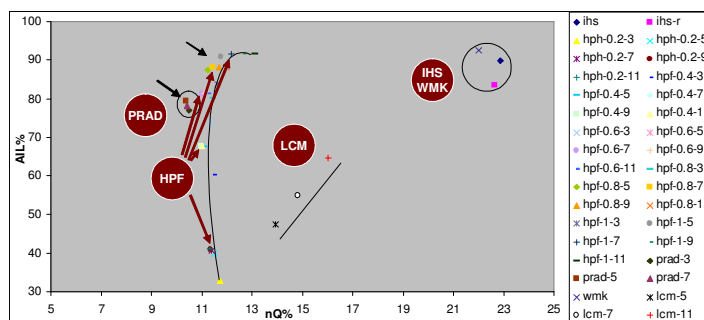
Wizualna ocena prowadzona była dwuetapowo, w obu przypadkach odrębnie dla KB 123 i KB 234. W pierwszym etapie porównywano zgodność KB powstającej w wyniku integracji obrazów zdegradowanych z bazowymi kompozycjami opartymi o oryginalne kanały. W drugim kroku dla celów kontrolnych testowano przydatność fotointerpretacyjną KB w wyższej rozdzielczości, porównując wzajemnie ze sobą produkty integracji.

6. Dyskusja wyników

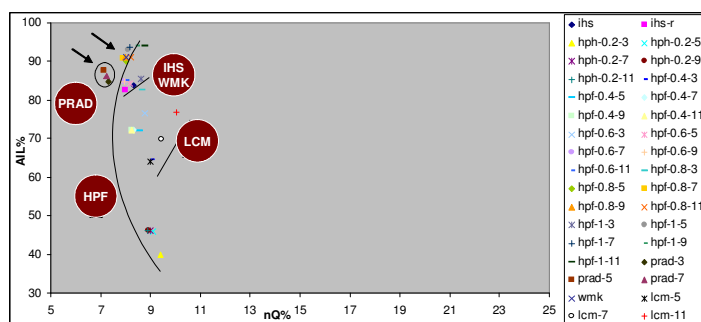
Poniżej, metodą „diagramu wyników” (Pirowski, 2006) zestawiono uzyskane rezultaty dla integracji zdegradowanych danych Ikonos, dla KB 123 (Rys. 4) i KB 234 (Rys. 5). Na legendzie znalazło się zestawienie wszystkich testowanych metod i wariantów, wraz ze skrótowym opisem parametrów danego rozwiązania. Dla przykładu opis „hpf-0.6-3” oznacza metodę integracji HPF z wagą 0.6 i oknie filtracji górnoprzepustowej 3x3; „prad-5” oznacza metodę Pradines’a, o oknie filtracji dolnoprzepustowej 5x5; „lcm-5” oznacza metodę LCM o oknie poszukiwań lokalnej korelacji 5x5; „ihs” oznacza metodę IHS z normalizacją obrazu PAN poprzez dobór średniej i wariancji obrazu PAN, a „ihs-r” z normalizacją przez zastosowanie regresji liniowej; „wmk” oznacza metodę Wiemker’a. Dla uczytelnienia rysunków na diagramie, w kołach, opisano nazwy testowanych rozwiązań, dodatkowo liniami, krzywymi lub okręgami zaznaczając trendy w zmianach wartości par wskaźników $nQ\%/AIL\%$ w obrębie danej metody. Z uwagi na dużą ilość testowanych wariantów podejścia HPF, dla KB 123 wskazano strzałkami - biegnącymi od nazwy „HPF” - położenie wyników tej metody.

Analizując diagramy (Rys. 4 i Rys. 5) łatwo zauważyć, że najniższe zniekształcenie spektralne notuje się dla metod PRAD i HPF (niskie wartości $nQ\%$, położenie po lewej stronie diagramów), przy czym wzmocnienie obrazów tą ostatnią metodą wzrasta wraz z wielkością okna filtracji górnoprzepustowej. Wysokie uczytelnienie (wysokie wartości $AIL\%$, położenie w górnej części diagramów) uzyskuje się stosując metody IHS i WMK, jednak dla KB 123 wskaźniki wykazują bardzo wysokie zniekształcenie tematyczne obrazów, praktycznie dyskwalifikujące te formuły. Metoda LCM znajduje się pośrodku tego zestawienia, przy czym jej wadą jest relatywnie niskie wzmocnienie przestrzenne obrazów.

Metoda HPF charakteryzuje się stabilnością wyników niezależnie od kompozycji barwnej, cechuje się też najlepszymi parametrami formalnymi i wysokimi walorami interpretacyjnymi. Nieco gorsze wyniki formalne i wizualne, ale nadal relatywnie bardzo dobre, osiąga się stosując metodę PRAD. W obu wytypowanych metodach kluczowy dla uzyskania optymalnych rezultatów jest odpowiedni dobór okna filtracji. W przypadku metody PRAD najlepsze wyniki uzyskano stosując filtrację w oknie równym lub niewiele większym niż krotność różnicy rozdzielczości. Ponieważ w testowanych przypadkach stosunek rozdzielczości obrazu spektralnego do panchromatycznego wynosi 4:1 to zalecany rozmiar filtra wynosi 5x5. Podobną zależność notuje się dla metody HPF, gdzie najlepsze rezultaty formalne uzyskano stosując filtrację 5x5 i 7x7, ze wskazaniem w analizie wizualnej na wariant większych okien. Na Rys. 4 i Rys. 5 w lewym górnym obszarze diagramu strzałkami biegnącymi w prawo, w dół, wskazano omawiane powyżej warianty metod HPF i PRAD. Można powiedzieć, że okno optymalnej filtracji górnoprzepustowej mieści się pomiędzy krotnością a dwukrotnością stosunku rozdzielczości łączonych danych obrazowych. Dokładne sprecyzowanie tej zależności wymaga dalszych badań.



Rys. 4. Diagram wyników - integracja zdegradowanych obrazów Ikonos (KB 123)



Rys. 5. Diagram wyników - integracja zdegradowanych obrazów Ikonos (KB 234)

W trakcie analizy wizualnej wyników scalania danych zdegradowanych 16/4 m i danych oryginalnych 4/1 m zauważono, że metoda PRAD daje relatywnie gorsze rezultaty dla obrazów w wyższej rozdzielczości. Oznacza to, że w jej przypadku wątpliwe jest

przenoszenie wyników testów na inne rozdzielczości, czy inne dane. Tę ograniczenia nie notuje się dla metody HPF.

Poniżej przedstawiono uzyskane rezultaty dla obrazów Ikonos 4m+1m (Rys. 6), w KB 234, dla wybranych formuł scalania. Ze względów redakcyjnych ilustracja w formie drukowanej jest sprowadzona do odcieni szarości, co pozwala czytelnikowi jedynie na ocenę – i to niestety w ograniczonym zakresie – stopnia uczytelnienia szczegółów.



Rys. 6. Integracja obrazów Ikonos (KB 234)

7. KONKLUZJE

Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, iż podejście wykorzystujące obrazy zdegradowane i „diagram wyników” umożliwia prawidłową selekcję metod scalania. Dzięki temu można obliczyć w prosty sposób, jakich zniekształceń spektralnych i jakiego poziomu wzmocnienia przestrzennego można się spodziewać stosując określoną metodę integracji. To z kolei pozwala na utworzenie rankingu metod, wyboru metod najlepszych a odrzucenia najgorszych. W prowadzonych testach pięciu metod scalania w ten sposób wytypowano, jako najlepszą, metodę HPF, za najgorsze uznając IHS i WMK.

Celowa wydaje się kontynuacja badań przy zastosowaniu większej liczby metod łączenia obrazów. Zwiększenie ilości analizowanych danych, a szczególnie zróżnicowanie krotności rozdzielczości łączonych obrazów umożliwi zbudowanie bardziej wszechstronnego rankingu metod integracji. Kluczowe wydaje się podanie reguły decyzyjnej pozwalającej na prawidłowe interpretowanie zależności wskaźników uczytelnienia oraz zniekształcenia spektralnego, w tym podanie brzegowych, akceptowalnych dla użytkownika ich wartości.

Dodatkowym aspektem kontynuacji takich badań powinna być ocena przydatności scalonych danych do klasyfikacji, w tym zgodność rankingu metod opartego o wskaźniki formalne w stosunku do uzyskanych wyników klasyfikacji.

8. LITERATURA

Chavez P. S., Sides Jr., S. C., Anderson J. A., 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 57, No. 3.

Garguet-Duport B., Girel J., Chassery J. M., Pautou G., 1996. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62.

Hallada W. A., Cox S., 1983. Image sharpening for mixed spatial and spectral resolution satellite systems. *Proc. of the 17th International Symposium on Remote Sensing of Environment*.

- Hill J., Diemer C., Stöver O., Udelhoven Th., 1999. A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolutions in forestry applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32.
- Lewiński S., 2001. Zastosowanie transformacji RGB-HIS w przetwarzaniu zdjęć satelitarnych. *Teledetekcja Środowiska*, nr. 32.
- Mróz M., 2001. Podwyższenie rozdzielczości przestrzennej obrazów wielospektralnych Landsat 7 ETM+ przy wykorzystaniu właściwych teksturalnych i radiometrycznych kanału panchromatycznego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 11.
- Mularz S., 2001. Teledetekcyjny monitoring środowiska kopalń odkrywkowych. *Konferencja Jubileuszowa 50-lecia WGGiS AGH*, Kraków.
- Mularz S., Drzewiecki W., Pirowski T., 2000. Thematic information content assessment of aerial and satellite data fusion - Cadastre, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Perspectives. *Proceedings of 2-nd International Conference, Lviv. National University „Lvivska Polytechnica”*.
- Mularz S., Pirowski T., 2006. Aspekty metodyczne integracji danych teledetekcyjnych w oparciu o metodę IHS i jej modyfikacje. *Zeszyty naukowe AGH, „Geodezja”*, T.12, z.2, cz.1.
- Pellemans A. H. J. M., Jordans R. W. L., Allewijn R., 1993. Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 59.
- Pirowski T., 2005. Ocena przydatności metod integracji zobrazowań teledetekcyjnych pozyskiwanych różnymi sensorami. *Praca doktorska AGH, Wydz. Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, nie publikowana*, Kraków.
- Pirowski T., 2006. Integracja danych teledetekcyjnych pochodzących z różnych sensorów - propozycja kompleksowej oceny scalonych obrazów. *Geoinformatica Polonica*, z. 8. Kraków.
- Pradines D., 1986. Improving SPOT images size and multispectral resolution. *Proceedings of the S.P.I.E. Earth Remote Sensing using Landsat Thematic Mapper and SPOT Systems*, Vol. 660.
- Ranchin T., Wald L., 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 66.
- Schowengerdt R. A., 1980. Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency content. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 10.
- Vrabel J., 2000. Multispectral imagery advanced and sharpening study. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 66.
- Wald L., 2000. Quality of high resolution synthesized images: is there a simple criterion? *Proc. of the Conference Fusion of Earth Data, Sophia Antipolis, France*.
- Wiemker R., Prinz B., Meister G., Franck R., Spitzer H., 1998. Accuracy assessment of vegetation monitoring with high spatial resolution satellite imagery. *Contribution to the ISPRS ECO BP'98*, Budapest.
- Zhou J., Civco D. L., Silander J. A., 1998. A Wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 19.

**VARIOUS FORMULAS FOR PAN-SHARPENING
OF MULTISPECTRAL IKONOS IMAGES –
STATISTICAL AND VISUAL ASSESSMENT OF RESULTS**

KEY WORDS: merging, satellite data fusion, visual assessment, statistical analysis, Ikonos

SUMMARY: The article presents the results of integrating spectral images of lower resolution with higher resolution panchromatic images. The analysis was performed on Ikonos images. Five different methods of integration were applied, each in many variants.

The main aim of the research was to find an optimal method to guarantee obtaining pan-sharpened images with preservation of the features of spectral images. Unusual methodology was applied. Deliberately degraded panchromatic images were used in an additional testing stage where the original spectral images became reference ones. This allowed a comparison between synthetic and original images and showed the factual distortion and enhancement of spectral images while applying various integration formulas.

The HPF method provided the best formal indices and high interpretation properties of the fused images. The standard IHS method of integration gave the poorest results in performed tests.

dr inż. Tomasz Pirowski
pirowski@agh.edu.pl
(012) 617-22-72
(012) 617-39-93

mgr inż. Grażyna Bobek
gaga_b@op.pl